

# 大自由度ヘビ型ロボットの自律分散制御に関する研究

著者	佐藤 貴英
号	57
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	工博第4769号
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/61695">http://hdl.handle.net/10097/61695</a>

氏 名	さとう たかひで
授 与 学 位	佐 藤 貴 英 博士 (工学)
学位授与年月日	平成25年3月27日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電気・通信工学専攻
学 位 論 文 題 目	大自由度ヘビ型ロボットの自律分散制御に関する研究
指 導 教 員	東北大学教授 石黒 章夫
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 吉澤 誠      東北大学教授 中島 康治

## 論文内容要旨

現在のロボットの多くは、タスクや環境をあらかじめ限定することによって問題を定式化可能な形に落としこみ、その制約内であれば確実に動作するよう設計されている。そのため、現実世界のような完全には構造化できない未知の環境では、その機能が著しく劣化してしまうという問題を抱えている。一方生物は、たとえ原始的な種と分類されるものであっても、身体に有する膨大な自由度を巧みに操りながら、時々刻々と予測不可能的に変動する非構造的な実世界環境下で、実時間かつ合目的に振る舞いを自己組織化しながら対処することが可能である。したがって、その振る舞いの発現メカニズムの解明は、生物そのものの理解にとどまらず、既存技術では達成しえない高い環境適応性を有するロボットの構築につながる期待される。

このメカニズムを解明するための中核的な概念となるのが自律分散制御である。自律分散制御とは、単純な知覚・判断・行動出力を持つ要素（自律個）が多数集まり相互作用することで、自律個単体では記述し得ない非自明な機能を大域的に創発させる制御方策である。しかしながら、従来の自律分散制御則では、ある程度の環境適応性は実現されているものの、実際の生物が示す振る舞いを再現するまでには至っていないのが現状である。この原因は、制御則を構成する素過程やネットワークポロジ、センサフィードバック様式などが各事例でアドホックかつテーラーメイドに設計されており、それゆえ自律分散制御の核となる基本原理に関する統一的な考察が不十分であったためである。

このような状況を打破するためには、適切なモデル生物に着目して議論する必要がある。そこで著者はヘビに着目した。ヘビは、一次元ひも状という単純な身体構造であるにもかかわらず、環境に応じて適切に振る舞うことが可能である。その中でも特徴的な振る舞いとして、地面の凹凸部などの足場となる箇所にも動的に身体を押しつけ、そこから得られる反力を活用しながら推進する

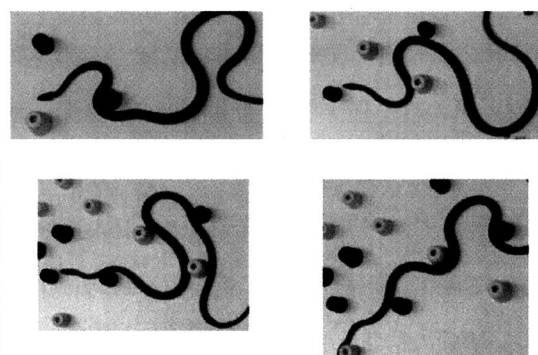


図1：ヘビが示す足場を活用したロコモーション

「足場を活用したロコモーション（図 1）」が知られている。これは、従来のロボットにとって推進性能の低下の要因となる環境の非構造的性を、逆に活用して推進力を得ているという点で驚くべきものである。このように、単純な身体構造から生み出されるヘビの適応的運動機能からは、生物の持つ優れた運動制御機構に関する有用な知見を少なからず学び取ることができるはずである。

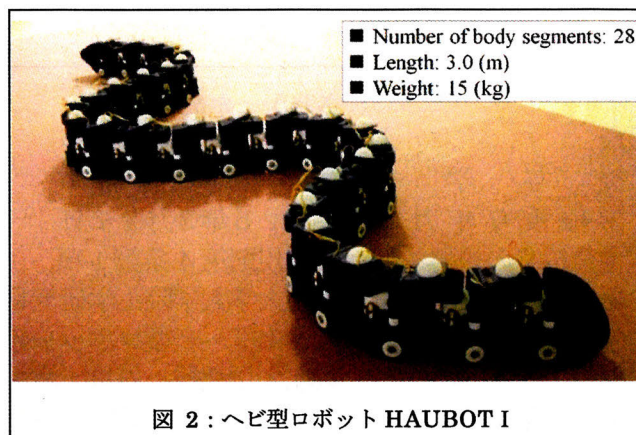


図 2：ヘビ型ロボット HAUBOT I

これまで著者らの研究グループでは、原初的な真正粘菌変形体のロコモーションに着目し、深部感覚情報に基づく局所センサフィードバックを用いることで環境適応的な位相のダイナミクスが議論可能な自律分散制御則の設計スキームを抽出してきた。そして、著者はこの設計スキームを真正粘菌よりも進化的に上位に位置するヘビのロコモーションに適用し、ヘビ型ロボット HAUBOT I（Hyper-redundant Adaptive Undulatory roBOTic system I：図2）を用いてその妥当性を検証してきた。ロボットは地面の摩擦や狭窄空間などの環境変化に対して適応的に振る舞うことが確認された。また、身体故障に対する耐故障性というロボティクスの観点からも興味深い機能をも発現可能であった。しかしながら、上り斜面や凹凸のある地面におけるロコモーションが困難であり、その環境適応性には限界が見られた。

そこで本研究では、HAUBOT Iにおける問題を解決する自律分散制御則の提案、ヘビ型ロボット実機を用いた検証実験を通して、ヘビの運動の背後に内在する自律分散制御則を議論している。本論文はこれらの成果をとりまとめたもので、全編4章からなる。

第1章は緒論であり、生物が示す振る舞いを再現可能な自律分散制御則を構築するためには、自律分散制御の核となる基本原理に関する考察が必要であることを述べている。その上でヘビに着目し、著者の従来研究を起点として、その適応行動の発現メカニズムに関して議論を展開する旨を述べている。

第2章では、著者の従来研究の問題の一つであった筋緊張のダイナミクスの不在を改善し、位相制御と筋緊張制御が連関した自律分散制御則を提案している。そして、実時間的に剛性を調整可能な関節機構を開発し、それを組み込んだヘビ型ロボット HAUBOT II（図3）を用いて、提案する制御則の妥当性を示している。実験の結果、ロボットは環境に応じて自律的に位相と筋緊張を調整することにより、地面の摩擦変化や斜度変化に対し

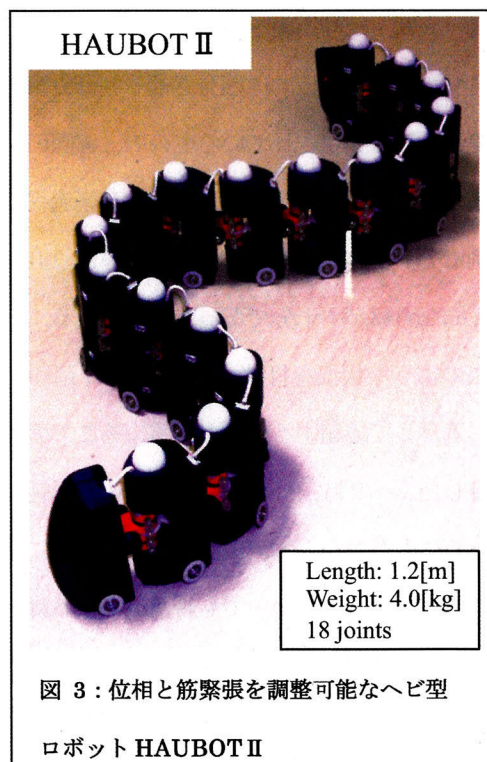
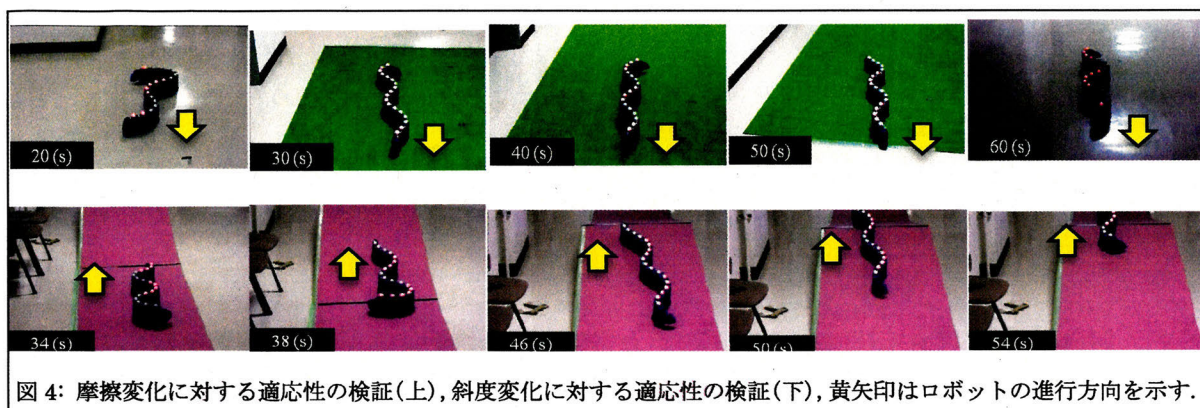


図 3：位相と筋緊張を調整可能なヘビ型ロボット HAUBOT II

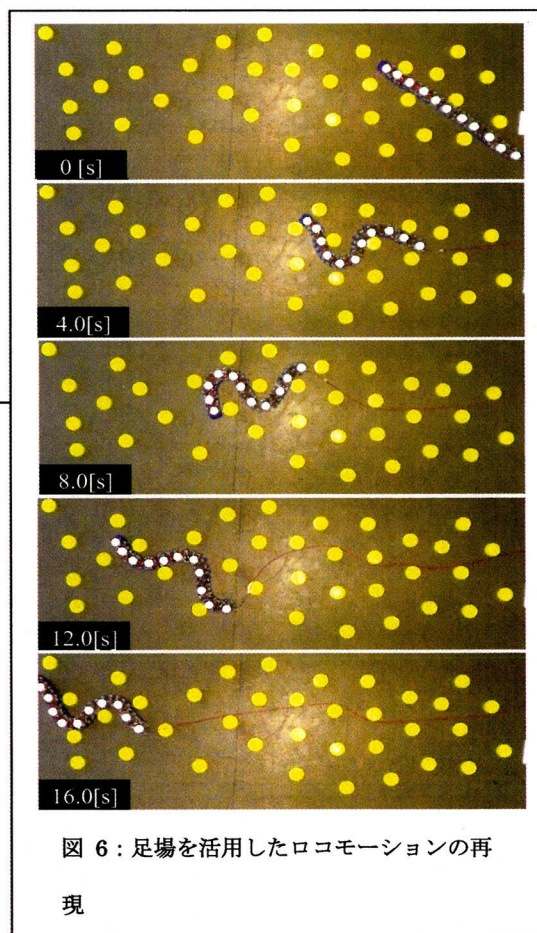




てHAUBOT I よりも適応的に振る舞うことが可能であることが確認された(図4)．この結果に基づき，提案する制御則に対する考察を与え，同時に解決すべき問題を議論している．

第3章では，HAUBOT I，II で議論された関節角度に関する深部感覚情報に基づくセンサフィードバックのみならず，表在感覚情報に基づくセンサフィードバックをも考慮した自律分散制御則を提案している．この制御則をロボットに実装することで，HAUBOT I，II では困難であった非構造環境下でのロコモーションが実現可能となる．本論文では，実際にその実現可能性がヘビ型ロボットHAUBOTIII (図5) による足場を活用したロコモーションを再現する実験を通して示されている．

以上要するに本論文は，ヘビをモデルとしてロボットを構築し，その制御系の設計を通して，ヘビの振る舞いの背後に内在する自律分散制御則のメカニズムを提示したものである．これらの成果は，生物が示す適応的振る舞いを議論する上できわめて有用な知見であり，生物の持つ優れた運動制御機構の理解の深化のみならず，ロボット工学の発展に寄与するところが少なくない．



# 論文審査結果の要旨

生物は、自身の身体に有する膨大な自由度を巧みに操ることで、予測不能的に変動する実世界環境下であっても驚くほど適応的な振る舞いを生成する。したがって、その発現機序の解明は、生物そのものの理解にとどまらず、既存技術では達成しえない高い環境適応性を有するロボットの構築にもつながると期待される。この機序解明に際して中核的な概念となるのが自律分散制御である。しかしながら、自律分散制御に関する体系的な設計論はいまだ存在していないため、実際の生物が示す振る舞いを再現するまでには至っていないのが現状である。これは、合目的かつ協働的振る舞いを発現するための「個（自律個）」と「全体（自律個集団）」をつなぐロジックが依然として明らかになっていないからである。このような状況を打破するためには、適切なモデル生物に着目してその適応的運動機能に内在する自律分散制御方策を解明することが有効な方法論となる。そこで著者はヘビに着目した。ヘビは、体節制に基づいた一次元ひも状の単純な身体構造にもかかわらず、身体各部の屈曲度合いやスティフネスの時空間分布を巧みに自己組織化することで、環境から効果的に反力を得ながら推進している。このように、単純な身体構造から生み出されるヘビの適応的運動機能からは、生物の持つ優れた運動制御機構に関する有用な知見を少なからず学び取ることができるはずである。本研究では、ヘビのロコモーションのモデル化、ならびに大自由度ヘビ型ロボット実機を用いた検証実験を通して、実世界環境に適応可能な自律分散制御方策を議論している。本論文はこれらの成果をとりまとめたもので、全編4章からなる。

第1章は緒論であり、既存研究が抱える問題点を指摘しながら自律分散制御の設計論構築が喫緊の課題であることを述べている。そして、適切なモデル生物を採り上げて、その振る舞いに内在する自律分散制御則を解明することが、このような現状を打破するために有効な方法論となることを示している。その上で、モデル生物としてヘビに着目する必然性について述べている。

第2章では、位相制御のみならず筋緊張制御をも同時に実現する自律分散制御則を提案し、その妥当性を検証するためにヘビ型ロボット実機 HAUBOT II を開発している。そして、位相制御と筋緊張制御を有機的に連関させることで、実世界環境下での実時間適応能力を著しく向上できることを、実機実験を通して示している。これはきわめて重要な成果である。

第3章では、HAUBOT II で議論された深部体性感覚に基づく局所センサフィードバックのみならず、表在感覚に基づく局所センサフィードバックをも考慮した自律分散制御則を提案している。そしてその妥当性を検証するために、ヘビ型ロボット HAUBOT III を新たに開発している。その上で、従来のロボットにとって推進性能の低下の要因となる環境の不整地性を、逆に足場として活用して推進力を得ているヘビの動きを再現できることを実験的に示している。これは注目に値する成果である。

第4章は結論である。

以上要するに本論文は、ヘビをモデルとして大自由度ロボットを構築し、その制御系の設計を通して、ヘビが示す高い適応的運動機能に内在する自律分散制御のメカニズムを提示したものである。これらの成果は、適応的かつ多様な振る舞いを示す大自由度システムの設計論の構築においてきわめて有用であり、電気・通信工学ならびにロボット工学の発展のみならず、生物の持つ優れた運動制御機構の理解の深化に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。